

平成**25**年度
建築基準整備促進事業報告会

「**S11** 長周期地震動に対する減衰材の
安全性能検証方法に関する検討」

事業者：大成建設(幹事会社), 鹿島建設, 清水建設, 竹中工務店

共同研究者：建築研究所, 日本免震構造協会, 防災科学技術研究所



調査の目的

多数繰り返し加力実験に基づいて、実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握し、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に寄与すること。



調査の内容

- (イ) 多数回繰り返し荷重を受ける減衰材の構造実験の実施と
既往研究成果の整理
エネルギー吸収性能の実験 (WG1)
- (ロ) 長周期地震動に対する免震建築物の応答評価の実施
免震部材特性の評価と建物応答評価 (WG2)
- (ハ) 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理
免震部材の特性評価に向けた試験条件の整理 (WG3)
- (ニ) 加速度応答スペクトルを用いた免震層の変位応答評価法の提案
免震部材の多数回繰り返し特性の組み込み手法の提案 (WG2)



調査の実施体制

■有識者による委員会（日本免震構造協会）

本委員会（主査：北村春幸）

免震部材実験WG（主査：高山峯夫）

建物応答評価・応答算定法検討WG

（主査：古橋剛）

免震部材試験法検討WG（主査：飯場正紀）



本日の報告内容

1. 多数回繰り返し荷重を受ける免震部材の構造実験の実施
(免震部材実験WG)
2. 加速度応答スペクトルを用いた免震層の変位応答評価法の提案
(建物応答評価・応答算定法検討WG)
3. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理
(免震部材試験法検討WG)

■ 実験対象部材

① 鉛ダンパー

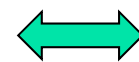
- ・ 長周期地震動応答波加振実験（水平二方向）
- ・ 多数回繰り返し加力実験（水平二方向）

② オイルダンパー（ユニフロー型・バイフロー型）

- ・ 長周期地震動応答波加振実験
- ・ 大速度繰り返し加力実験

③ 鉛プラグ入り積層ゴム 縮小試験体（Φ500, Φ250）

- ・ 同一条件加振実験
- ・ 同上現象再現加振実験

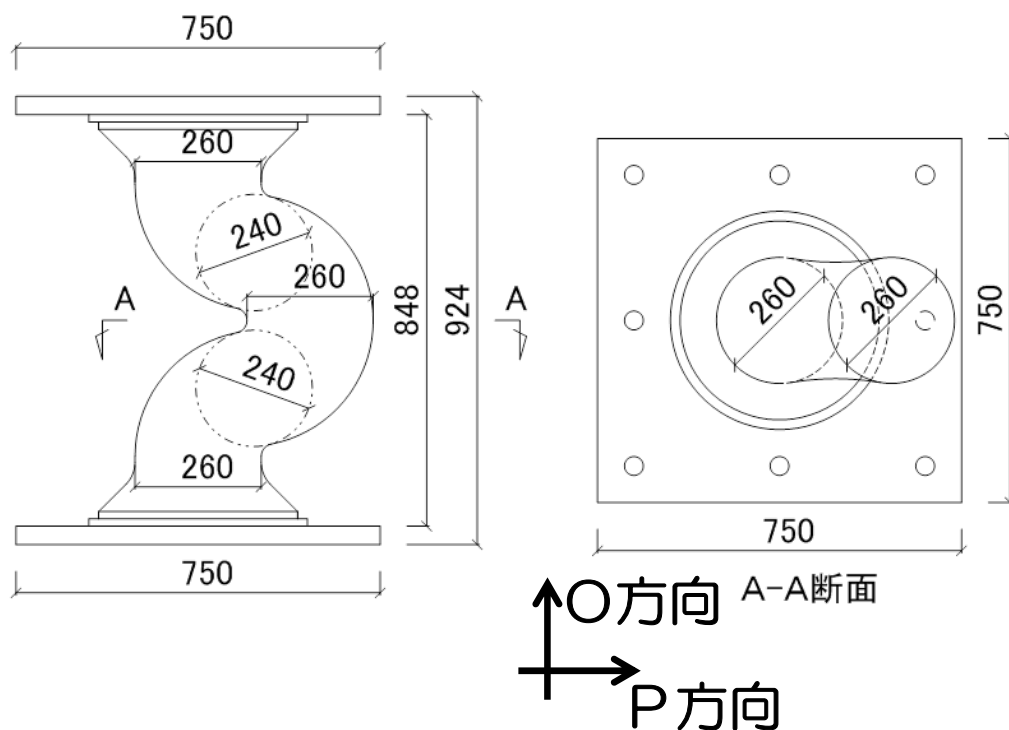


昨年度実施実大実験（27-3）

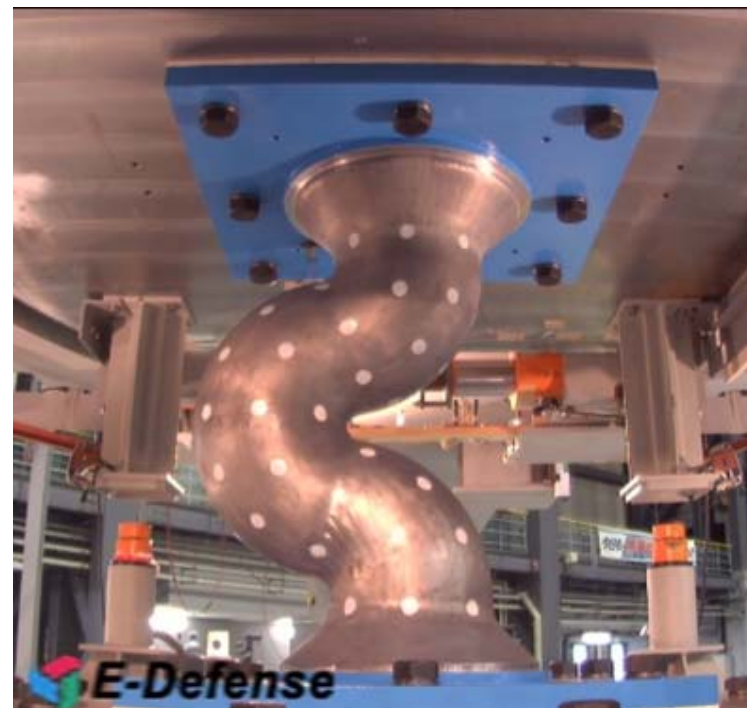
1. 免震部材実験の実施

鉛ダンパー

実大の免震構造用鉛ダンパー（U2426型）を用いた
水平二方向の多数回繰り返し加力実験を実施



鉛ダンパー概要

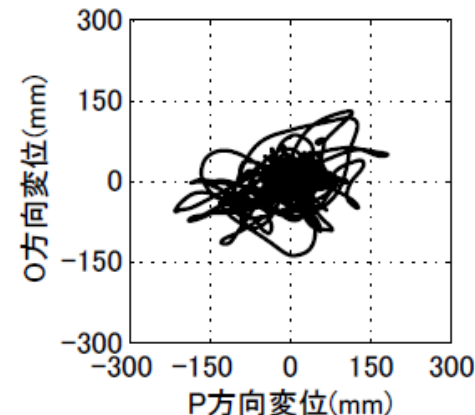
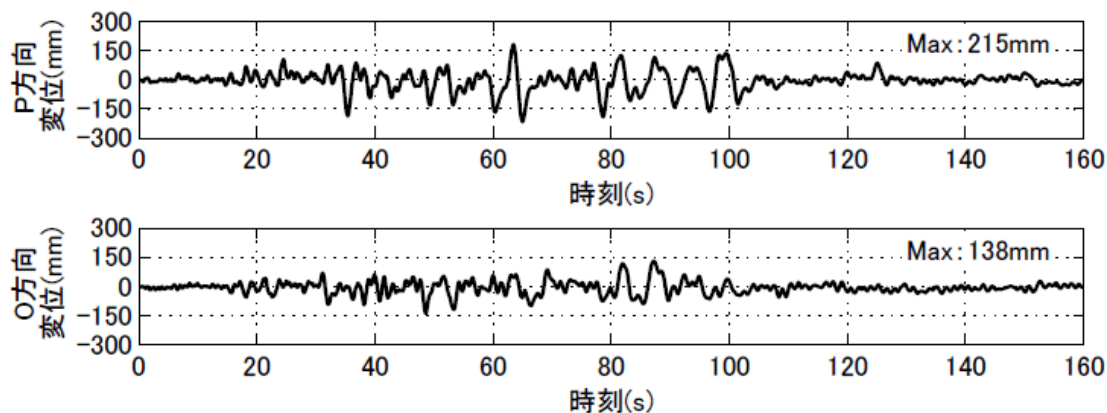


設置状況

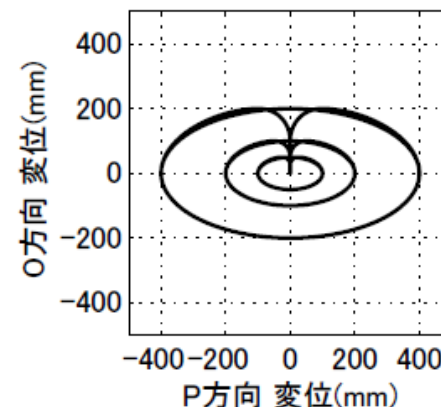
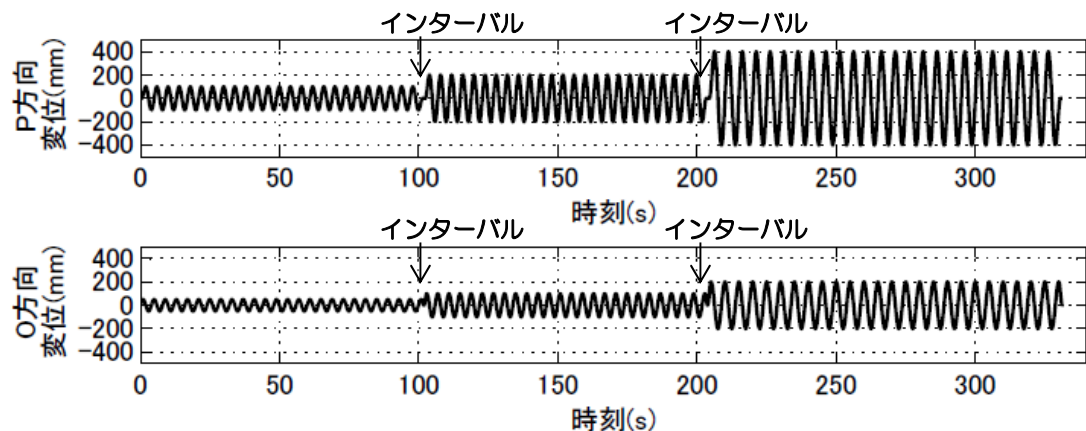
1. 免震部材実験の実施

鉛ダンパー

加力条件①：長周期地震動を想定した免震建物の地震応答波



加力条件②：3種類の振幅を用いた連続楕円波

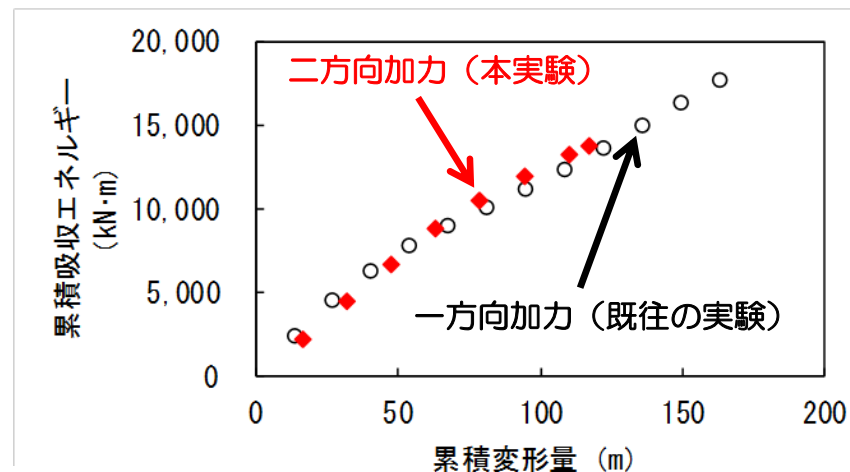
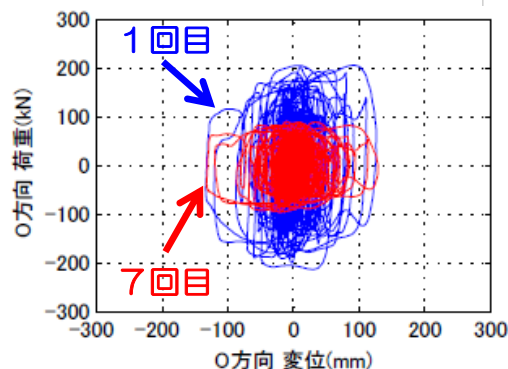
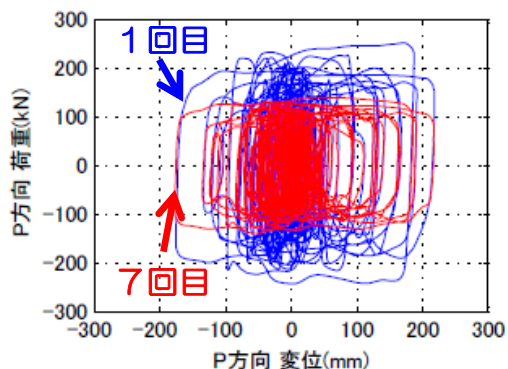
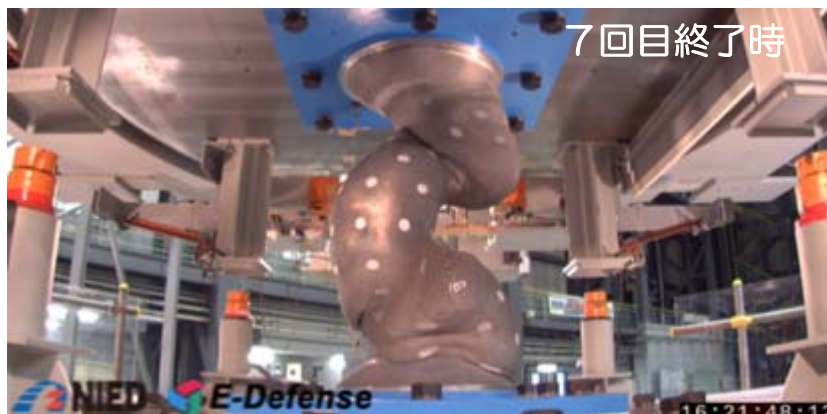


1. 免震部材実験の実施

鉛ダンパー

加力条件①（地震応答波）での実験結果

- ・ 繰り返しに伴い降伏荷重、吸収エネルギー量は徐々に低下
- ・ 長周期地震動を1回経験しても破断まで十分な余力を有していた



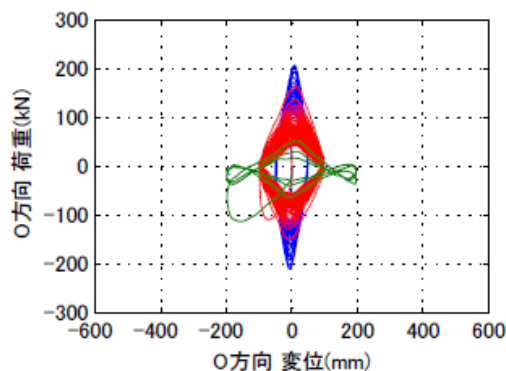
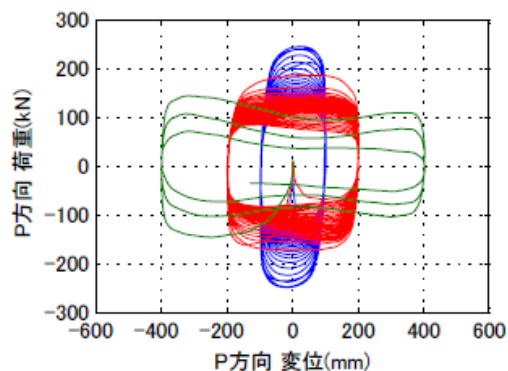
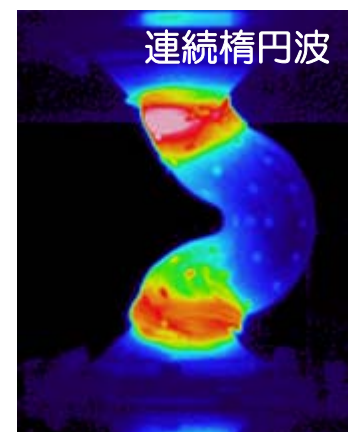
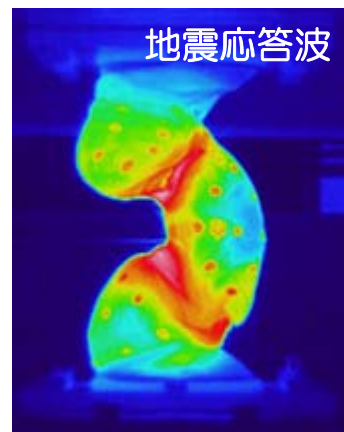
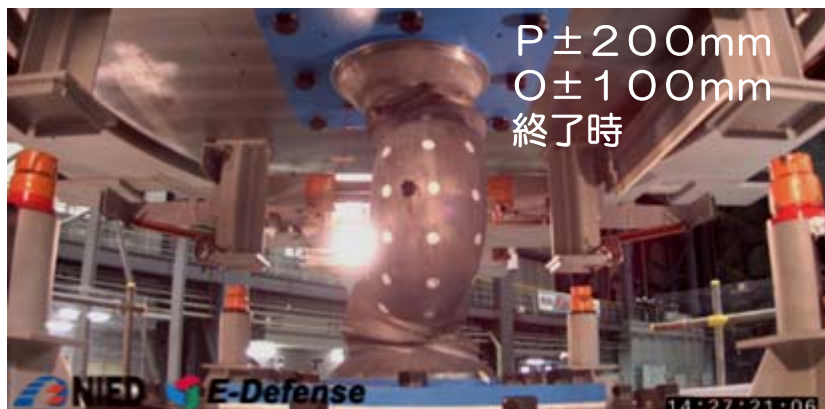
- ・ 破断（8回目）時の累積変形量は約117m
- ・ 一方向加力と二方向加力の特性に大きな違いは見られない

1. 免震部材実験の実施

鉛ダンパー

加力条件②（連続楕円波）での実験結果

- ・ 繰り返しに伴い試験体胴体部が捩れ、破断までに約260度回転
- ・ 破断時の累積変形量は約43m



サーモカメラ画像

- ・ 加力①では全体的に温度上昇
- ・ 加力②では上下端のみ温度上昇



エネルギーの吸収箇所が異なり、
累積変形量などに影響したと推察

1. 免震部材実験の実施

オイルダンパー

実大免震構造用オイルダンパー（ユニフロー型・バイフロー型）を用いた長周期地震動応答波，大速度繰返し加振を実施

試験体：

最大減衰力**1000kN**，ストローク**700mm**，限界速度**150cm/s**

減衰特性バイリニア型



ユニフロー型



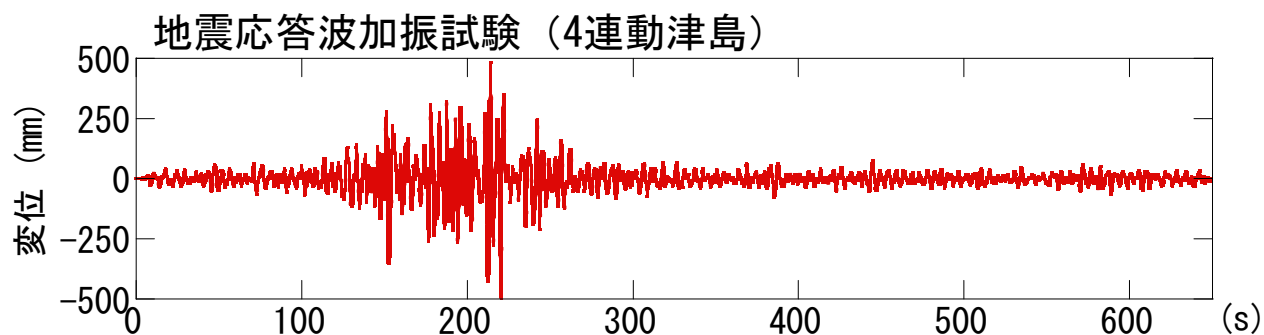
バイフロー型

設置状況

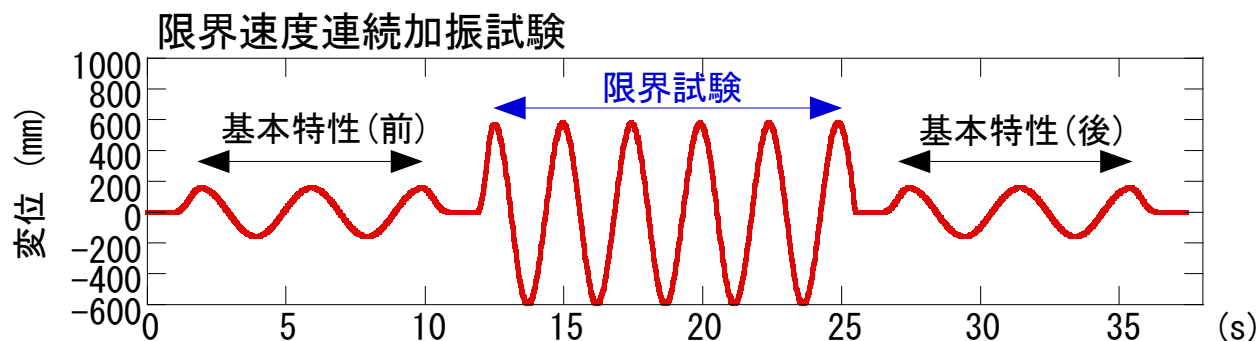
1. 免震部材実験の実施

オイルダンパー

加力条件①：長周期地震動（4連動津島）を想定した応答波
最大変位49.7cm，最大速度98.6cm/s，累積変形45.2m，継続時間12分間



加力条件②：大速度（150cm/s）の5サイクル繰り返し加振
周期2.5秒，±60cm，±150cm/s

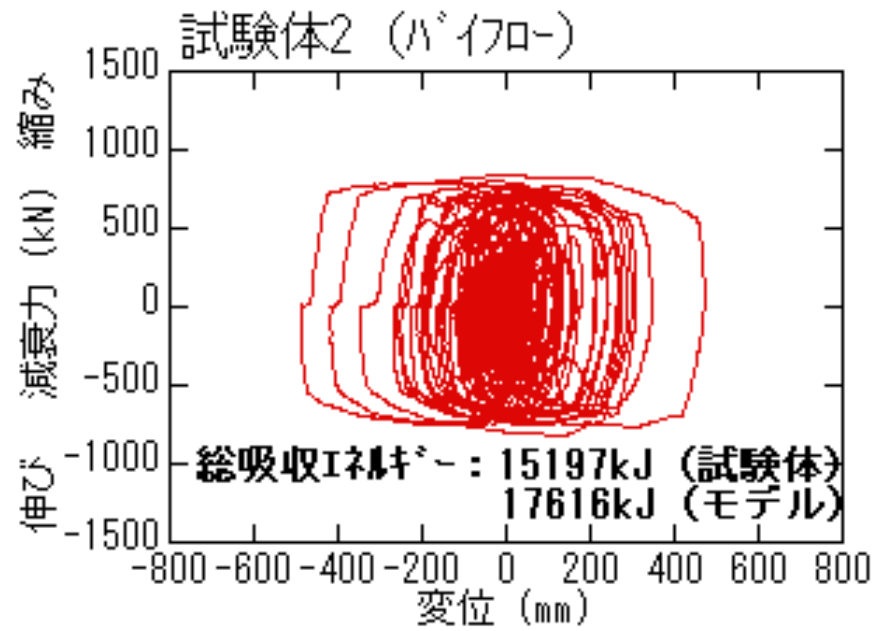
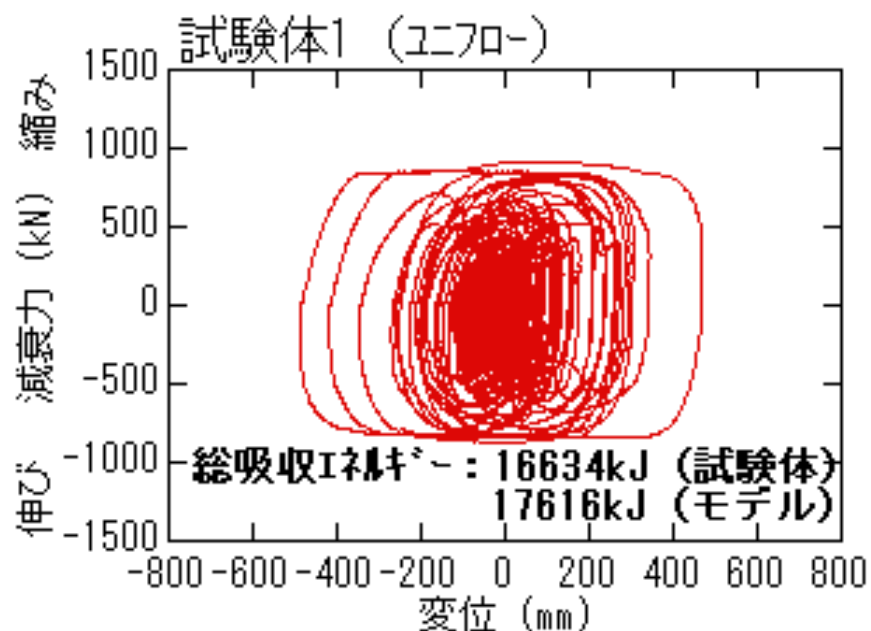


1. 免震部材実験の実施

オイルダンパー

加力条件①（4連動津島応答波）の実験結果

- ・ユニフロー型・バイフロー型とも安定した履歴ループ
- ・長周期地震動を1回経験しても、エネルギー吸収性能に変化無し



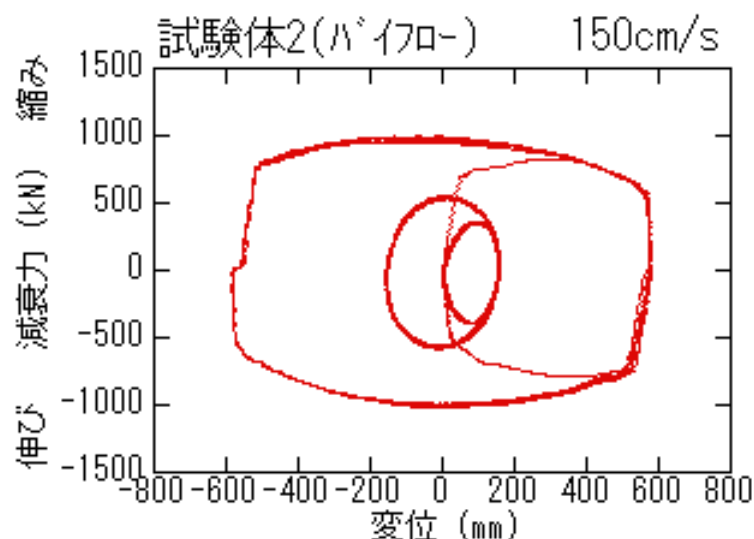
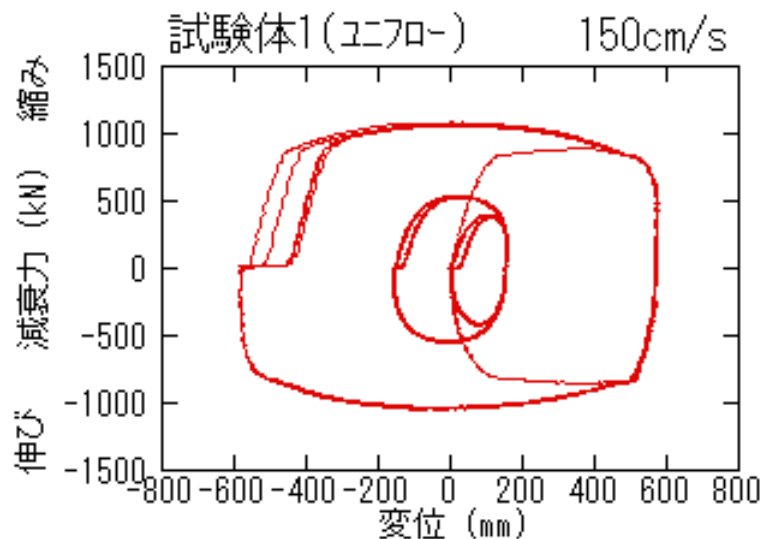
1. 免震部材実験の実施

オイルダンパー

加力条件②（大速度の5サイクル繰返し加振）の実験結果

- ・ユニフロー：吸い込み不足により，2サイクル目から立上り遅れが発生
エネルギー吸収量は5サイクル目で7%低下
- ・バイフロー：安定した履歴ループ

➡ ユニフローで履歴面積が減少したが，概ね性能を発揮

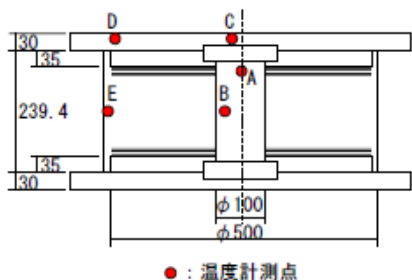


1. 免震部材実験の実施

鉛プラグ入り積層ゴム 縮小試験体実験

鉛プラグ入り積層ゴム縮小試験体
φ500, φ250による実験実施

試験体諸元



φ500試験体

項目	原型	1/2 縮小	1/4 縮小
試験体名称	—	φ500 試験体	φ250 試験体
外径(鉛径)(mm)	1000(200)	500(100)	250(50)
ゴム1層厚(mm)× 層数=ゴム総厚(mm)	6.0×33=198	3.0×33=99	1.5×33=49.5
内部鋼板厚(mm)	4.4	2.2	1.4



水平2方向加振装置

同一加振実験ケース

現象再現加振実験ケース

ケース名	加振条件
正弦波 1 方向	γ200%, 周期 4 秒, 35 サイクル
地震応答波 1 方向	γ109%(継続時間 160s), 1 回
地震応答波 2 方向	γ109%-70%(継続時間 160s), 6 回
2 方向楕円	γ200%(主軸)-100%(副軸), 周期 4 秒, 60 サイクル
2 方向真円	γ100%(φ500), γ200%(φ250), 周期 4 秒, 21 サイクル

ケース名	加振条件
2 方向楕円	φ500 試験体, γ200%(主軸)-100%(副軸), 周期 4 秒, 50 サイクル, 初期温度: 常温および高温(60~70 度)
2 方向真円	φ250 試験体, γ200%, 周期 2 秒, 50 サイクル 初期温度: 常温および高温(60~70 度)

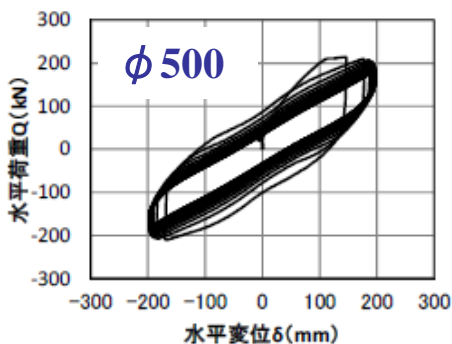
昨年度Eディフェンスで実施したφ1000
と同一加振ケース

昨年度Eディフェンスでφ1000で見られ
た現象(履歴面積小)再現ケース

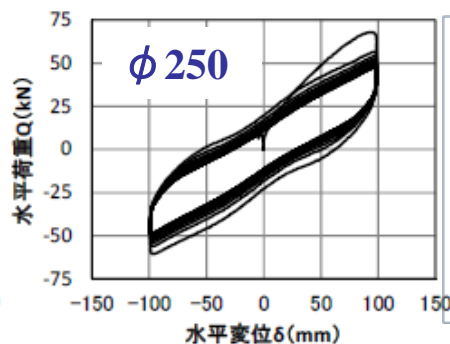
1. 免震部材実験の実施

鉛プラグ入り積層ゴム 縮小試験体実験

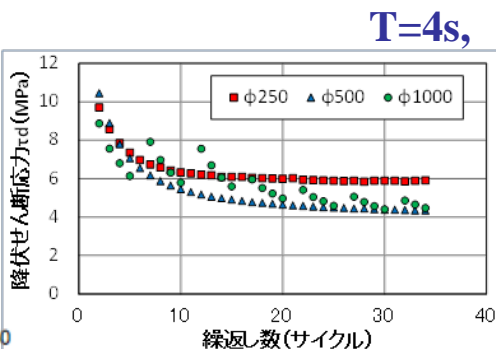
同一加振実験結果1



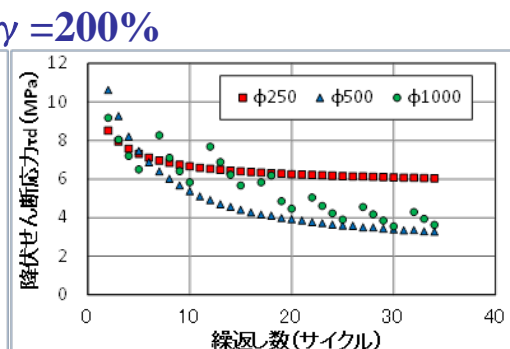
荷重変形関係



正弦波 1 方向加振結果

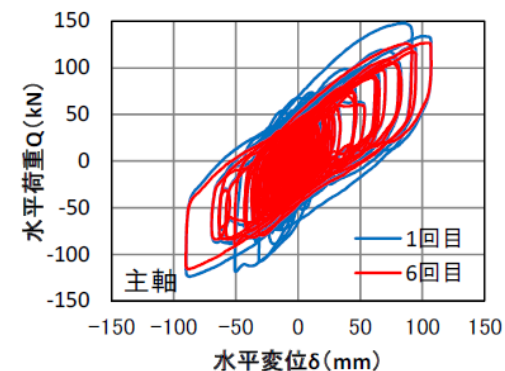


実験結果

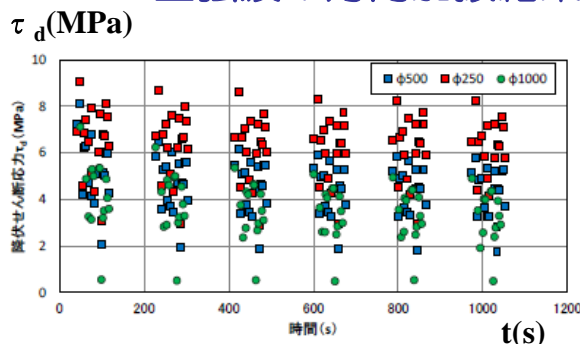


解析結果

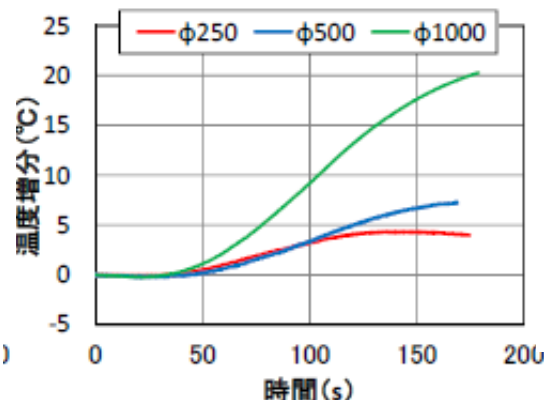
鉛降伏せん断応力の変化



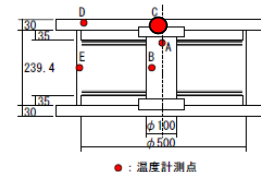
φ500荷重変形関係
(主軸方向)



鉛降伏せん断応力の変化



フランジ中央部の温度



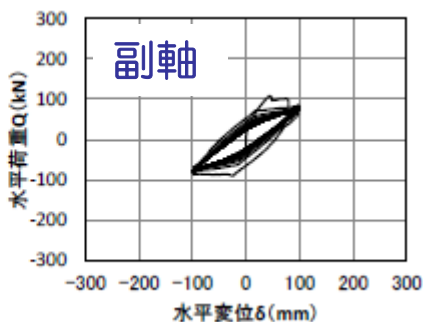
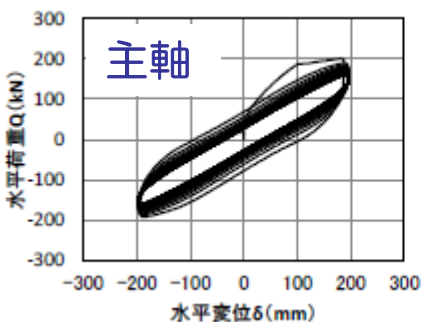
地震応答波加振結果 (2方向加振)

1. 免震部材実験の実施

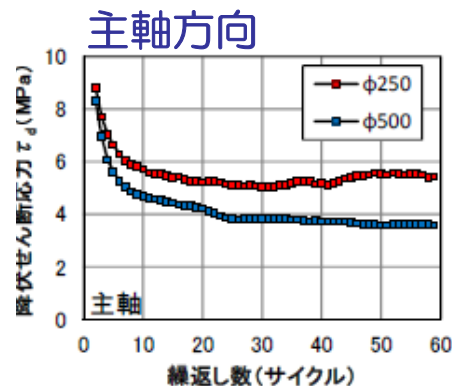
鉛プラグ入り積層ゴム 縮小試験体実験

同一加振実験結果2

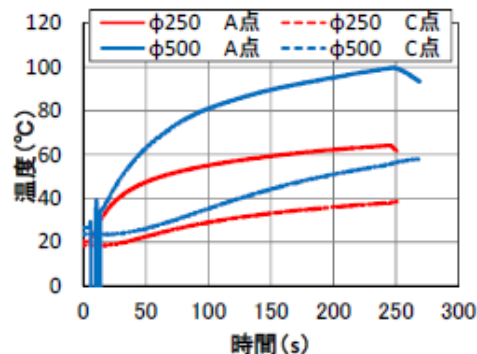
A:フランジ中央、C:鉛上部



Φ500 荷重変形関係



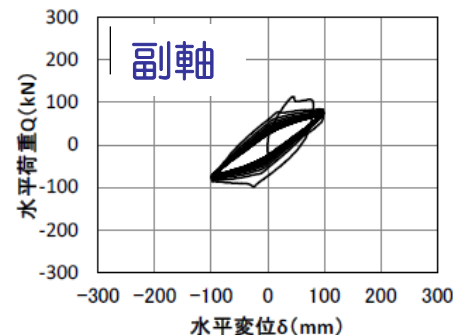
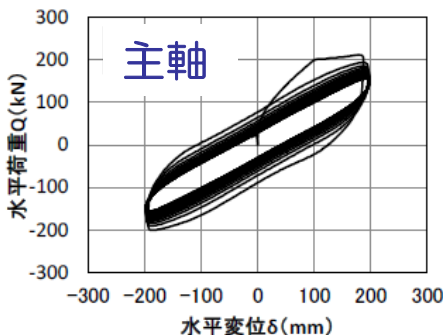
鉛降伏せん断応力



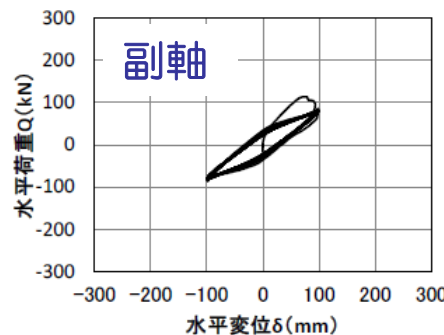
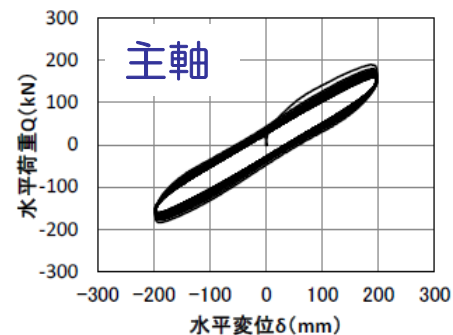
各部の温度

2方向楕円加振結果(T=4s,主軸 $\gamma = 200\%$,副軸 $\gamma = 100\%$)

現象再現実験



初期温度 19℃



初期温度 71℃

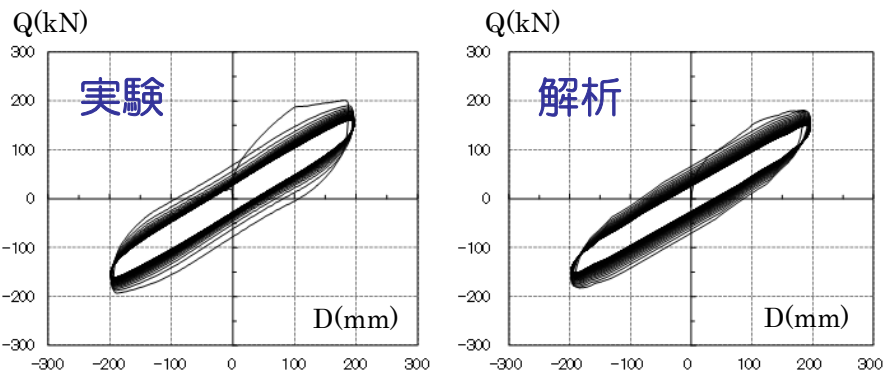
Φ500 荷重変形関係：(2方向楕円加振: T=4s,主軸 $\gamma = 200\%$,副軸 $\gamma = 100\%$)

1. 免震部材実験の実施

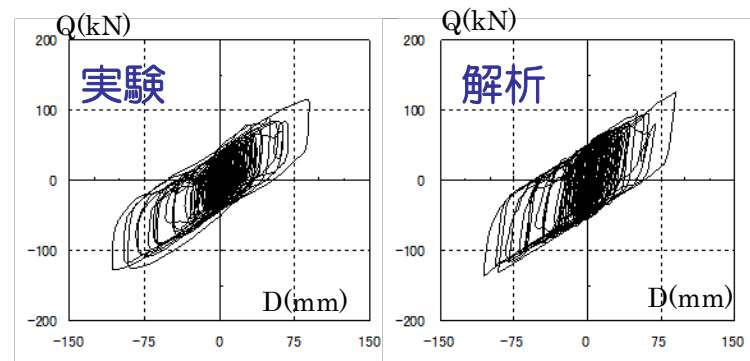
鉛プラグ入り積層ゴム 縮小試験体実験

シミュレーション解析結果

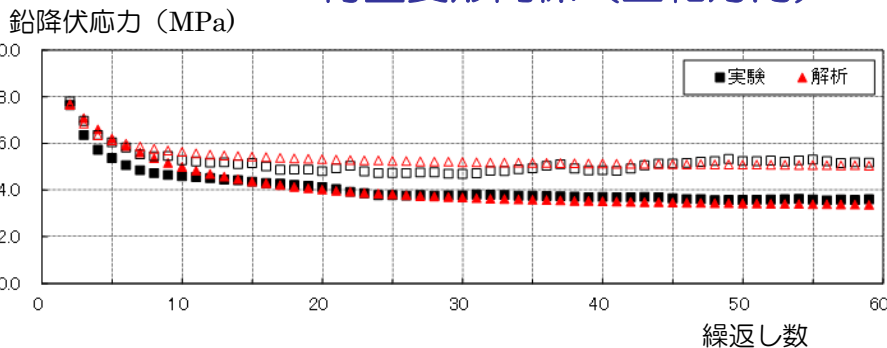
温度上昇による耐力低下を熱伝導解析による温度評価と合わせて考慮する解析手法により実験結果のシミュレーション解析を実施した。



Φ500 荷重変形関係（主軸方向）

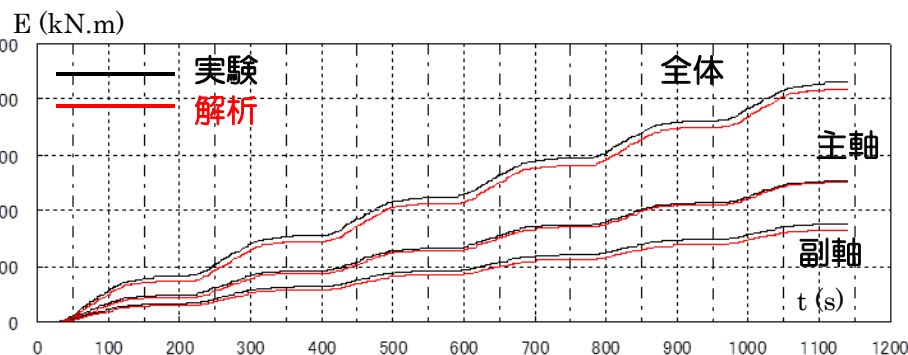


Φ500 荷重変形関係（主軸方向）



Φ500, Φ250 降伏荷重の変化

2方向楕円加振(T=4s, $\gamma=200\%$, 100%)



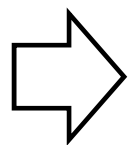
Φ500 吸収エネルギー

2方向地震応答波加振：6回目

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■実施内容

1. 多数回繰り返しの影響を考慮する
時刻歴地震応答解析（詳細法、簡易法）の再実施
 - ・ 検討用地震動の再設定
… 6地点1 2波の三連動地震予測波
2. 加速度応答スペクトルを用いた
多数回繰り返しの影響を表す応答算定法
（告示法）に関する検討
 - ・ 入力エネルギーの推定方法検討
 - ・ 地震力を求めるスペクトルの平滑化に関する検討



告示法の適用性について調査

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 検討用地震動の再設定

… 6地点 1 2波の三連動地震予測波

種別	地点	新宿	浜松	津島	名古屋	大阪	大阪此花
	記号	KGIN	SZO024	AIC003	AIC004	OSK005	OSKH02
平均	最大加速度 (cm/s ²)	42.11	576.78	199.40	494.87	127.84	98.49
平均+σ		77.24	1069.40	380.37	1355.84	246.63	147.15

平均：予測波のうち平均に近い波、平均+σ：予測波のうち平均+標準偏差に近い波

■ 入力エネルギーの推定方法

$V_E / \rho S_V$ 比の検討→加速度応答スペクトルによる推定方法を提案

$$V_E = 2.5 S_a (h=0.05) / \omega$$

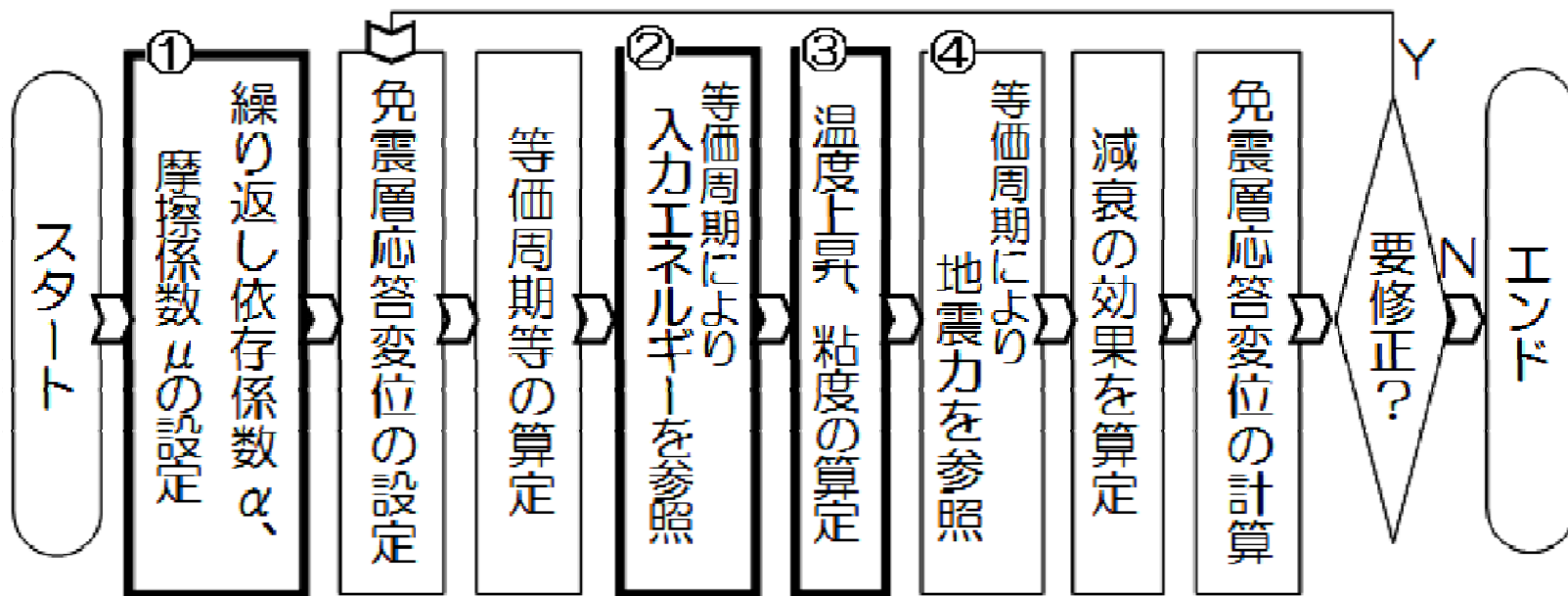
■ 地震力を求めるスペクトルの平滑化

大きめの減衰定数 h_0 による換算加速度応答スペクトルを用いた場合も実施

$$S_a (h=h_0 \rightarrow 0.05) = \frac{(1+10h_0)}{1.5} S_a (h=h_0)$$

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 応答算定法（告示法）のフロー



↑
変動させるパラメータは免震部材ごとに異なる

□ : 平成12年告示2009号第六の方法と異なる箇所

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 検討対象（免震システムを構成する免震部材）

1) 鉛プラグ入り積層ゴム

特性変動パラメータ：鉛降伏荷重

2) 高減衰積層ゴム

特性変動パラメータ：等価剛性、等価減衰係数

3) 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー

特性変動パラメータ：鉛ダンパーの降伏荷重

4) 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）

特性変動パラメータ：弾性すべり支承の摩擦係数

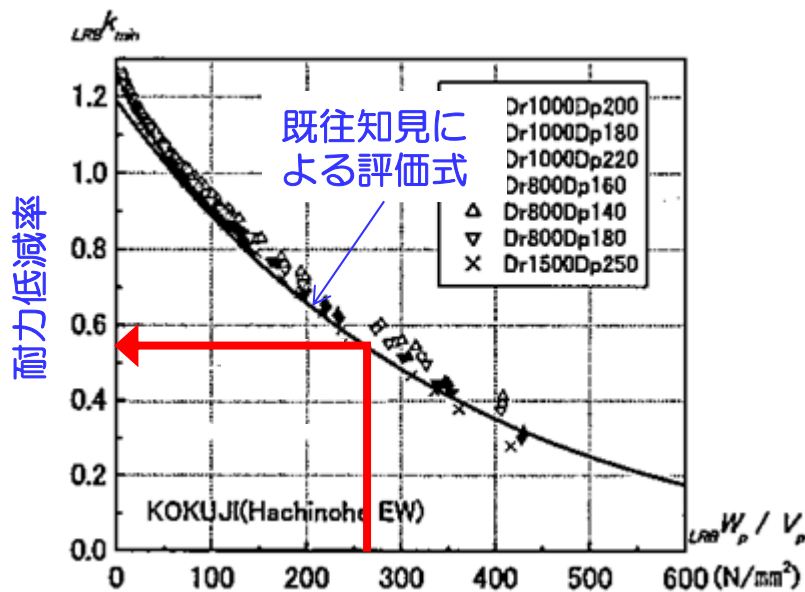
5) 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

特性変動パラメータ：粘性体の温度上昇（温度依存式は既往知見）

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

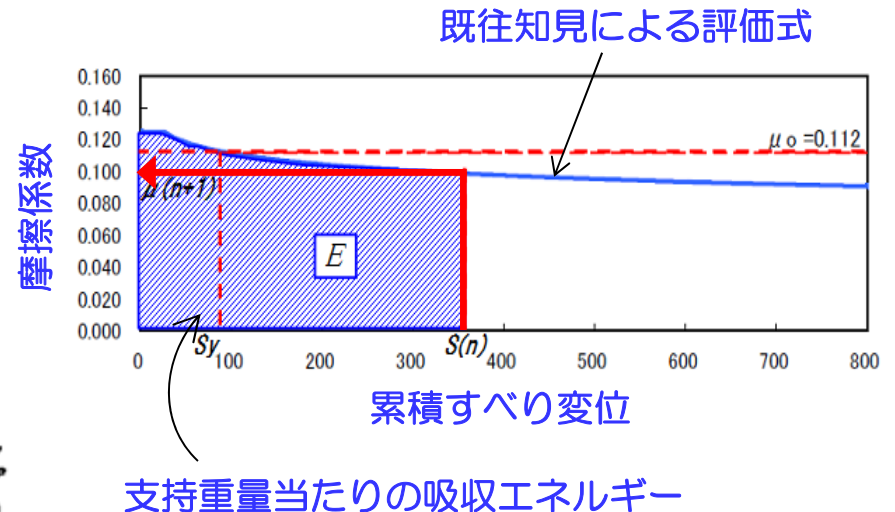
■ 特性変動の評価方法 (例)

1) 鉛プラグ入り積層ゴム



鉛プラグ体積当たりの吸収エネルギー

4) 弾性すべり支承 (高摩擦)



支持重量当たりの吸収エネルギー

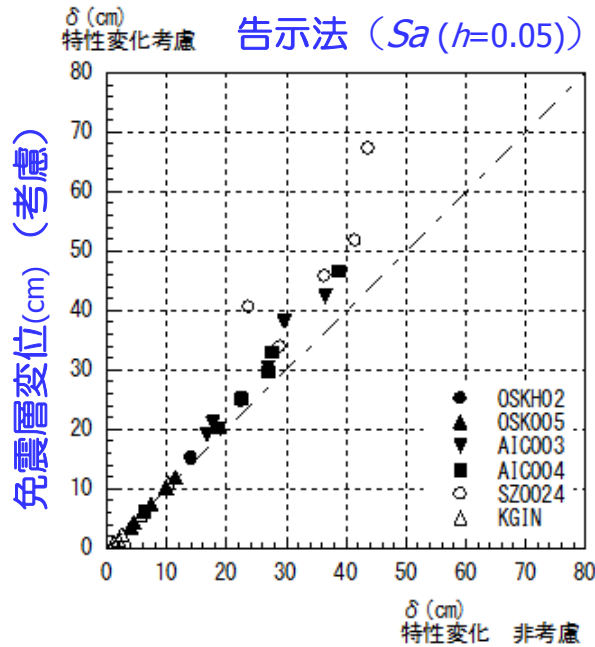
応答スペクトルを参照して求めた入力エネルギー

$$E = 0.5 M \cdot V_E^2, V_E = 2.5 S_a (h=0.05) / \omega$$

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

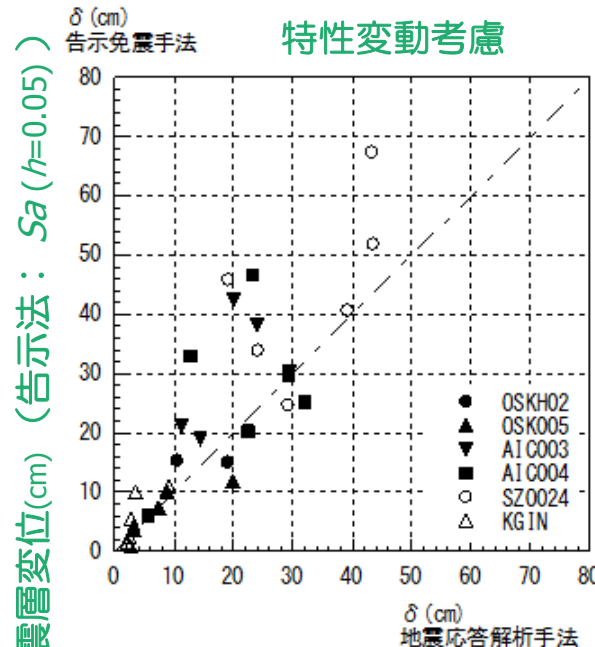
■ 検討結果-1

鉛プラグ入り積層ゴムを用いた免震システム



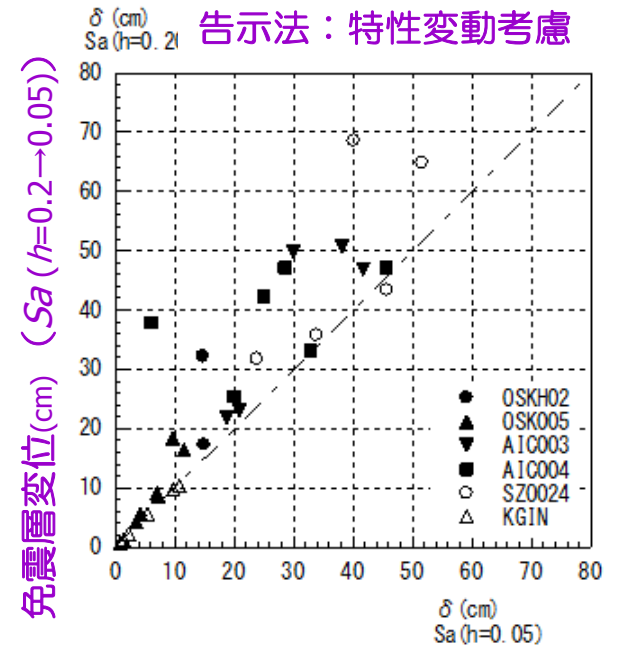
免震層変位(cm) (非考慮)

告示法による
特性変動考慮の結果



免震層変位(cm) (地震応答解析)

地震応答解析との比較



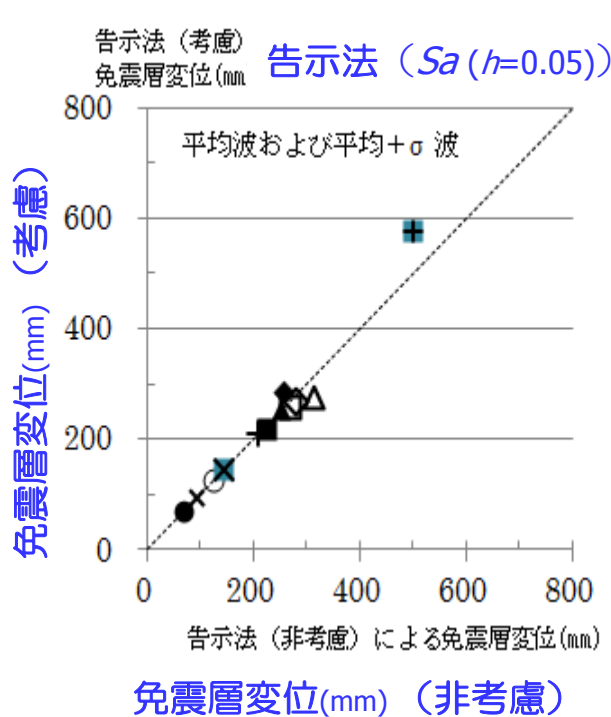
免震層変位(cm) ($S_a(h=0.05)$)

スペクトル平滑化
による影響

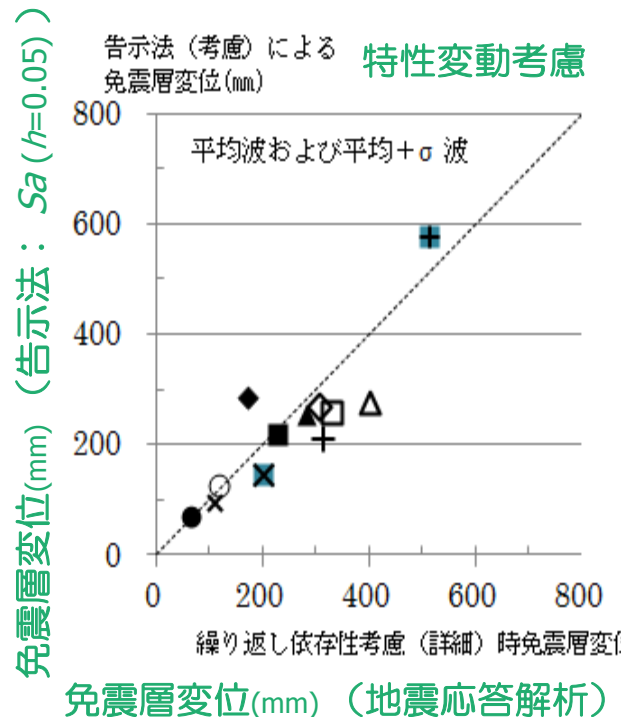
2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 検討結果-2 高減衰積層ゴムを用いた免震システム

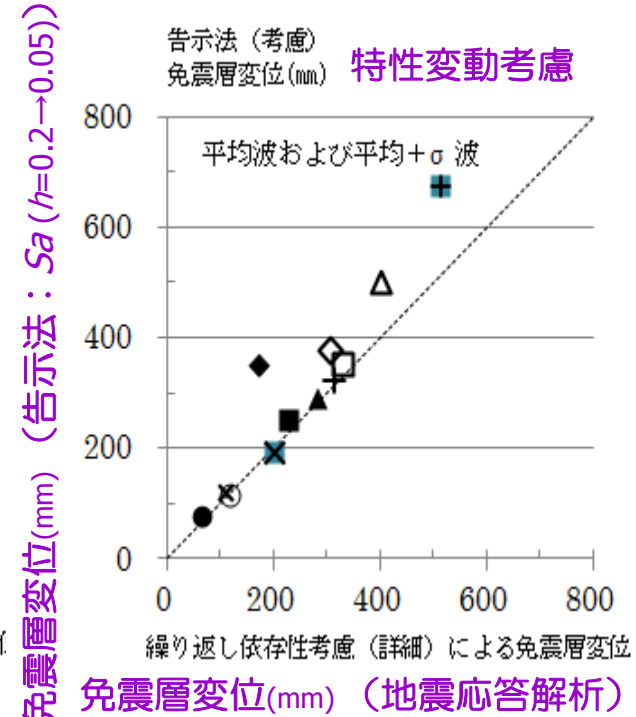
● KGIN.ave	○ KGIN.ave+σ
▲ SZ024.ave	△ SZ024.ave+σ
■ AIC004.ave	□ AIC004.ave+σ
◆ AIC003.ave	◇ AIC003.ave+σ
× OSK005.ave	■ OSK005.ave+σ
+ OSKH02.ave	■ OSKH02.ave+σ



告示法による
特性変動考慮の結果



地震応答解析との比較

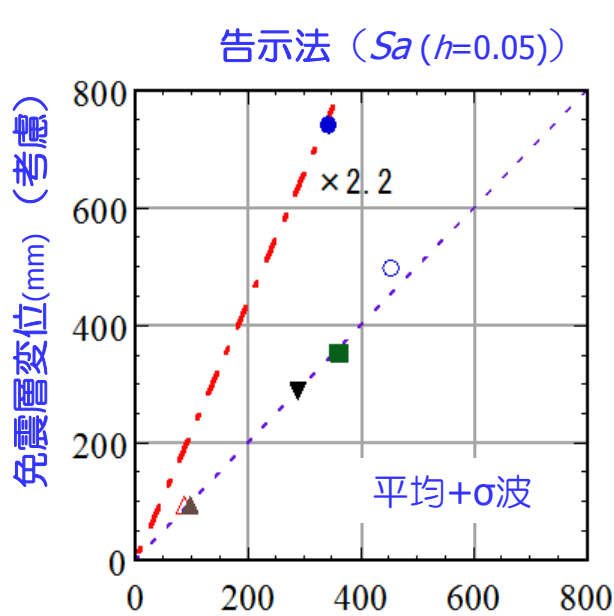
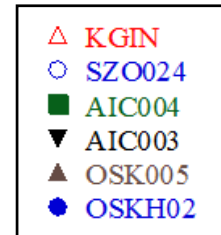


地震応答解析との比較
(スペクトル平滑化)

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

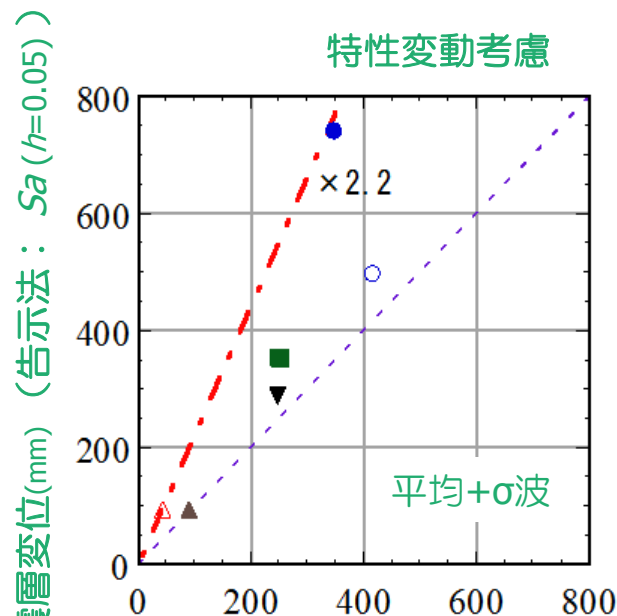
■ 検討結果-3

天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパーによる免震システム



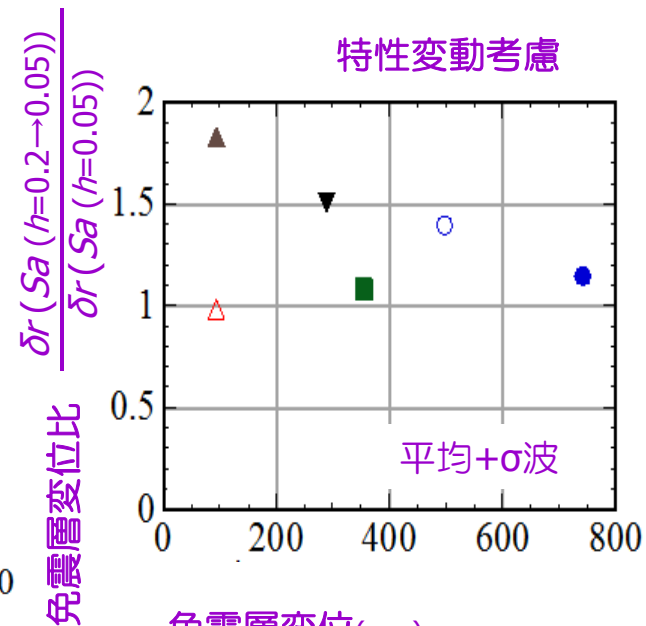
免震層変位(mm) (非考慮)

告示法による
特性変動考慮の結果



免震層変位(mm) (地震応答解析)

地震応答解析との比較



免震層変位(mm)
(告示法: $Sa(h=0.05)$)

スペクトル平滑化
による免震層変位比

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

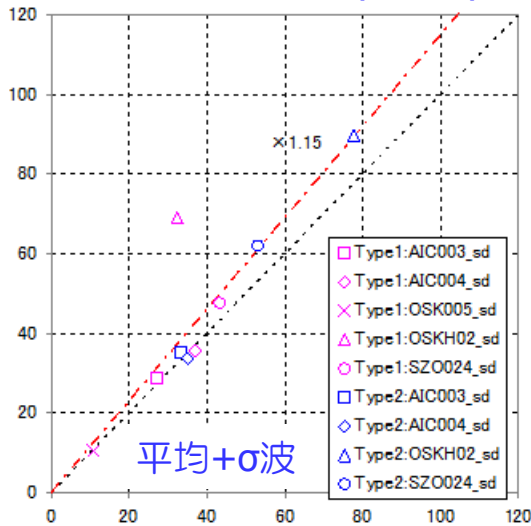
■ 検討結果-4

天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）による免震システム

Type1:弾性すべり支承の降伏せん断力係数	0.046
Type2:	//
	0.030

告示法 ($S_a(h=0.05)$)

免震層変位(cm) (考慮)

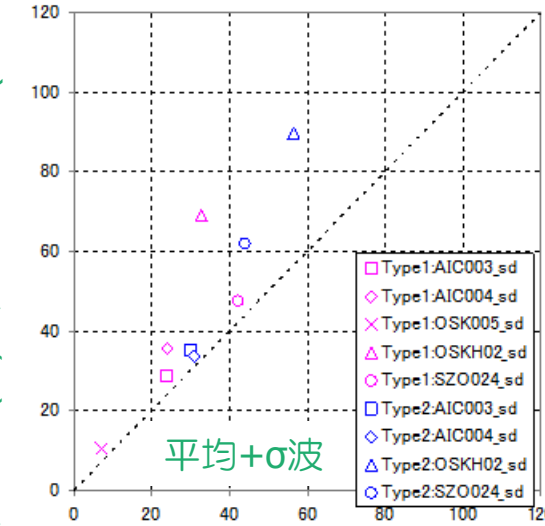


免震層変位(cm) (非考慮)

告示法による
特性変動考慮の結果

特性変動考慮

免震層変位(cm) (告示法 : $S_a(h=0.05)$)

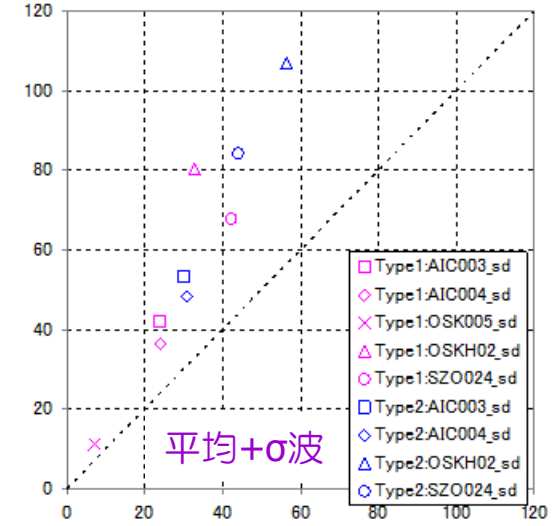


免震層変位(cm) (地震応答解析)

地震応答解析との比較

特性変動考慮

免震層変位(cm) (告示法 : $S_a(h=0.2 \rightarrow 0.05)$)



免震層変位(cm) (地震応答解析)

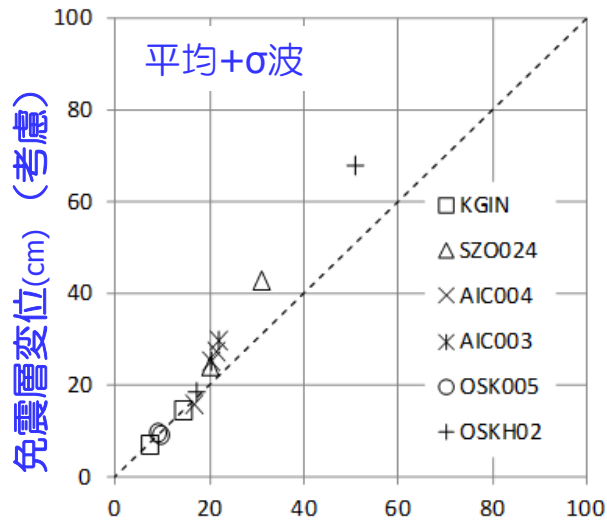
地震応答解析との比較
(スペクトル平滑化)

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 検討結果-5

天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承(低摩擦)+粘性ダンパーによる免震システム

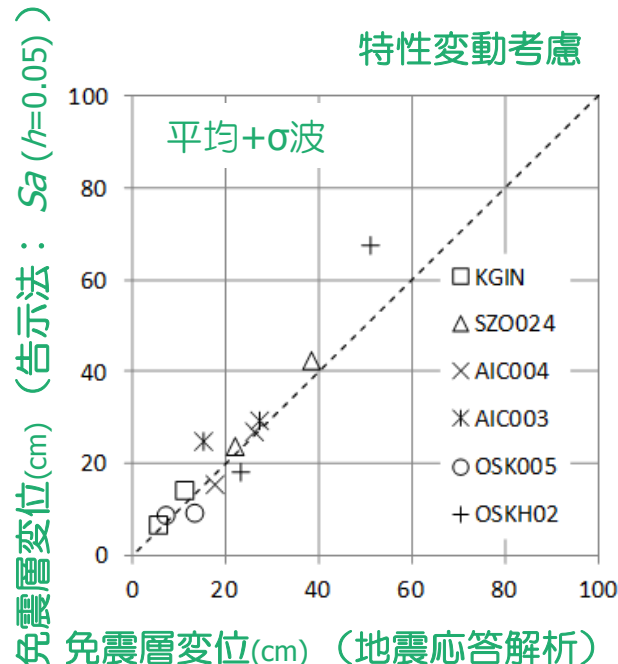
告示法 ($S_a (h=0.05)$)



免震層変位(cm) (非考慮)

告示法による
特性変動考慮の結果

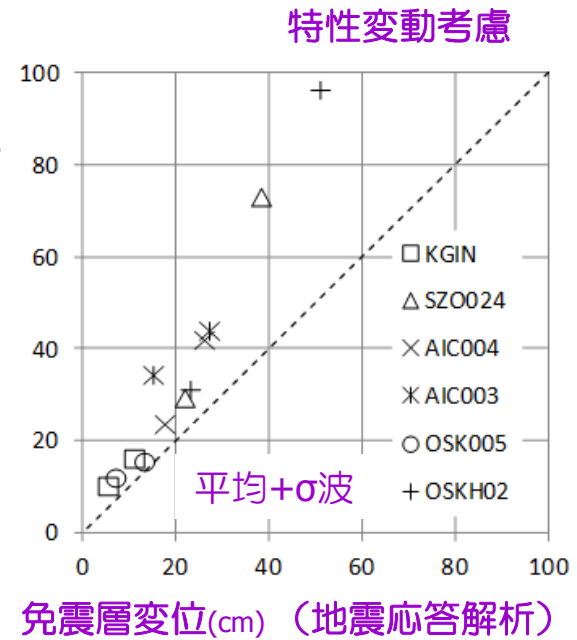
特性変動考慮



免震層変位(cm) (地震応答解析)

地震応答解析との比較

特性変動考慮



免震層変位(cm) (地震応答解析)

地震応答解析との比較
(スペクトル平滑化)

2. 加速度応答スペクトルを用いた応答算定法に関する検討

■ 検討結果のまとめ

- ・ 告示法による多数回繰り返しに伴う特性変動の考慮
特性変動の影響を安定した傾向で評価する

- ・ 地震応答解析との免震層応答変位比較

概ね安全側だが、免震システムごとにばらつき程度が異なる

ばらつきの要因として推定される項目：

免震システムごとの特性変動に対する敏感さの違い

地震動固有のばらつき要因を必ずしも反映できない

スペクトルの凹凸、入力エネルギーの参照方法、等価減衰定数の効果

- ・ スペクトルの平滑化に関する検討

全般に安全側となった（地震力が大きめに与えられた）

検討手順の収れん性は改善されたが、大きな凹凸の影響は残った



3. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理

- ・平成12年告示1446号には免震部材の試験法と特性評価法が示されているが、**長周期地震動**や**暴風強風**による**多数回繰返し条件**に対する記述がない。
- ・**建築基準整備促進事業27-3**および**本事業S11**では、既往文献の整理、免震部材の実大および縮小実験、免震部材特性のモデル化などを実施し、**多数回繰返し荷重を受ける免震部材の特性**を明確にしてきた。
- ・これらの知見に基づき、免震部材における**多数回繰返し特性把握**に必要な**試験法の考え方と試験条件の設定根拠**をまとめた。

3. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理

長周期地震動に対する試験条件の設定

- ・試験体の設定 実大が基本(試験装置による制約を考慮し縮小も可)
- ・加振条件 一定振幅による1方向正弦波動的加振を基本
加振振幅: 10~30cmで基本振幅Dを設定、その0.5倍と2倍についても実施
加振速度: 3~5秒で基本周期Tを設定(可能であれば0.5倍と2倍)
繰返し数: 累積変形量20m以上、可能であれば50mまで(限界状態)

振幅 周期	D×0.5	D×1.0	D×2.0
T×0.5	△	○	△
T×1.0	◎	◎	◎
T×2.0	△	○	△

◎必須、○可能なら、△必要な場合

・試験結果の評価

降伏荷重、剛性、履歴面積の変化などを把握、
破断限界や性能限界との関係を確認する

3. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理

強風・暴風に対する試験条件の設定

・試験条件案（正弦波加振試験、疲労特性試験）

試験種類	目的	対象免震部材	試験条件
正弦波加振試験	大型台風通過時などの暴風に対する免震部材の安全性を確認	全免震部材	【積層ゴム支承の場合】 荷重制御方式による動的加振を原則 一定水平荷重＋正弦波荷重 周期3秒以下、継続時間2～3時間以上
疲労特性試験	小振幅多数回繰返し加振により疲労特性を確認	疲労蓄積により破損が生じ得る部材	【鉛ダンパーの場合】(参考) 破断繰返し数 ±2mmの時、40万回 ±10mmの時 2万回

・試験結果の評価

損傷や破断などの限界、それに至るまでの力学特性の変化を把握する
限界性能が不明の場合、実験で確認された範囲内での使用を原則とする

まとめ

1. 多数回繰り返し荷重を受ける免震部材の構造実験の実施
 - ・鉛ダンパー：地震応答波加振では8回（累積変形**117m**）で、
楕円加力ではI補き-吸収箇所が地震応答波と異なり**43m**で破断
 - ・オイルダンパー：地震応答波加振では履歴ループは安定、
大速度加振では170-で履歴面積が減少するも概ね性能を発揮
 - ・鉛プラグ入り積層ゴム：同一加振では試験体サイズ大ほど降伏荷重低下大
再現加振では減衰性能低下を再現できず（⇔封入鉛プラグの形状変化）
2. 加速度応答スペクトルを用いた免震層の変位応答評価法の提案
 - ・応答算定法（告示法）は...
特性変動の影響を安定した傾向で評価する
地震応答解析に対して概ね安全側（免震システムごとにばらつき異なる）
3. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理
 - ・基整促事業（**27-3、S11**）の成果および既往知見の整理に基づき
長周期地震動、強風・暴風に対する試験条件を整理した